Eine Methode zur Bestimmung der Strahlung in absolutem Mass

und

die Konstante des Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetzes.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Walther Gerlach.

Tübingen
1912.

Von der Fakultät angenommen am 1. März 1912.

Separat-Abdruck aus den

Annalen der Physik.

Vierte Folge. Band 38.

1912.

1. *Eine Methode zur Bestimmung der Strahlung in absolutem Maß und die Konstante des Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetzes;*

von Walther Gerlach.

M. Ch. Féry[1]) veröffentlichte 1909 eine neue Methode zur absoluten Strahlungsmessung und fand mit dieser einen um 18,4 Proz. höheren Wert für die Konstante des Strahlungsgesetzes

$$S = \sigma(t + 273)^4,$$

als nach den Messungen von F. Kurlbaum[2]) angenommen wurde. An Stelle des Kurlbaumschen Wertes

$$\sigma = 5{,}32 \times 10^{-12}\,\text{watt}\,\text{cm}^{-2}\,\text{grad}^{-4}$$

erhielt er aus einer großen Reihe allerdings nicht sehr gut übereinstimmender Resultate das Mittel

$$\sigma = 6{,}30 \times 10^{-12}\,\text{watt}\,\text{cm}^{-2}\,\text{grad}^{-4}.$$

Während sich in der Féryschen Methode bisher kein prinzipieller Fehler nachweisen ließ, konnte Hr. Prof. Paschen[3]) zeigen, daß eine absolute Messung nach dem Kurlbaumschen Bolometerprinzip bei Verwendung eines ungleichmäßig dicken Bolometers[4]) einen zu kleinen Wert geben muß. Ich habe daher auf Anregung von Hrn. Prof. Paschen nach einer von ihm angegebenen Methode, bei welcher die der Kurlbaumschen Messung nach Paschen anhaftende Unsicherheit vermieden ist, welche aber in jeder anderen Beziehung (bestrahlte Oberfläche, Strahlung von 100° zu 0°) der Kurlbaumschen Messung entspricht, die Konstante σ neu bestimmt.

1) Ch. Féry, Bull. Soc. Franc. d. Phys. (2) **4.** 1909; Ann. de chim. et phys. (VIII) **17.** p. 267. 1909; Compt. rend. **148.** p. 515. 1909.

2) F. Kurlbaum, Wied. Ann. **65.** p. 746. 1898.

3) F. Paschen, Ann. d. Phys. **38.** p. 30. 1912.

4) F. Kurlbaum, Ann. d. Phys. **2.** p. 552 oben. 1900.

§ 1. Methode und Formeln.

Zwei Diaphragmen von den Flächen F_1 und F_2 haben die Entfernung R. Durch F_1 strahlt ein schwarzer Körper von der absoluten Temperatur T_1. Hinter F_2 stehe ein geschwärzter Streif von der absoluten Temperatur T'. Der Streif empfängt die Strahlung

$$S_1 = \frac{\sigma}{\pi}(T_1^4 - T'^4)\frac{F_1 \cdot F_2}{R^2}.$$

Er erwärmt sich um Δt_1; die pro Sekunde von ihm fortgehende Wärmemenge ist dann $C\Delta t_1 = S_1$. Diese Wärmemenge erwärmt die Lötstellen einer Paschenschen Thermosäule, welche gleichmäßig über die Hinterfläche des Streifens verteilt sind, so daß das Galvanometer eine konstante Gleichgewichtslage n_1 annimmt. Die Vertauschung des schwarzen Körpers von T_1 gegen einen anderen von der niederen Temperatur T_2 bedingt die Strahlung

$$S_2 = \frac{\sigma}{\pi}(T_2^4 - T'^4)\frac{F_1 \cdot F_2}{R^2},$$

die Streifenerwärmung um Δt_2, die fortgehende Wärme $C\Delta t_2 = S_2$ und die Galvanometereinstellung n_2. Nunmehr werde ein solcher Betrag $A i^2 \omega$ an Joulescher Wärme dem Streif zugeführt, daß die Galvanometereinstellung wieder n_1 wird. Die fortgehende Wärme ist dadurch vermehrt um

$$C(\Delta t_1 - \Delta t_2) = S_1 - S_2$$

und zwar nach Paschen[1]) auch dann, wenn der Streif ungleichmäßig dick ist, und infolgedessen eine ungleichmäßig verteilte Temperaturerhöhung bei elektrischer Heizung erfährt. Die Joulesche Wärme ist dann nach obigem gleich der gesuchten Strahlung

$$A i^2 \omega = \frac{\sigma}{\pi}(T_1^4 - T_2^4)\frac{F_1 F_2}{R_2}. \tag{1}$$

Die Größe A ist durch die gewählte Einheit der Leistung bedingt und wird eins, wenn die pro Sekunde durch Strahlung übertragene Energie nach Watt gemessen wird. σT^4 bedeutet die pro Sekunde von 1 cm² der Temperatur T in die vor σ liegende Halbkugel gestrahlte Energie.

1) F. Paschen, Ann. d. Phys. 38. p. 30. 1912.

Mein Meßverfahren ist ähnlich demjenigen, welches K. Ångström[1]) bei seinem absoluten Strahlungsmeßapparat befolgt. Während aber Ångström die Temperatur nur einer Stelle seines Streifs mißt, messe ich die von der ganzen Hinterfläche des Streifs fortgehende Wärme, was nach Paschen bei ungleichmäßig erhitztem Streif notwendig ist.

An Formel (I) ist eine Korrektion anzubringen, weil nicht alle Flächenelemente des Strahlers und Empfängers zueinander senkrecht stehen und die Entfernung dieser Flächenelemente verschieden ist. Sei $dx\,dy$ ein Element der einen, $dx'\,dy'$ ein Element der anderen Fläche, R die kürzeste Entfernung der beiden Flächenebenen und r die Entfernung der beiden Elemente, so ist die Strahlung der Elemente zueinander proportional der Größe

$$\frac{dx\,dy\,.\,dx'\,dy'}{r^2}\cos(n,r)\cos(n',r').$$

Die Integration dieses Differentials ergibt

$$(2)\qquad \frac{F_1\,.\,F_2}{R^2}\left(1-\frac{1}{6}\,\frac{a^2+b^2+a_1{}^2+b_1{}^2}{R^2}\right),$$

wenn $(a\,b)$ und $(a'\,b')$ die Dimensionen der beiden Flächen sind und Glieder höherer Ordnung von

$$\frac{a'}{R},\quad \frac{b'}{R},\quad \frac{a}{R},\quad \frac{b}{R}$$

vernachlässigt werden, was bei den benutzten Dimensionen ohne Fehler geschehen darf. Gleichung (1) ist also rechts mit der Klammergröße der Gleichung (2) zu multiplizieren.

§ 2. Apparate und Versuchsanordnung.

Die Thermosäule war nach dem Prinzip der von F. Paschen[2]) beschriebenen Thermosäule angefertigt. Um die Anwendung möglichst großer bestrahlten Flächen zu ermöglichen und die eingangs genannte Bedingung der Theorie zu erfüllen, die von der ganzen Hinterfläche des Meßstreifens fortgehende Wärme-

1) K. Ångström, Act. Reg. Soc. Upsala, Juni 1893; Phys. Rev. 1. p. 365. 1893; Wied. Ann. 67. p. 633. 1899.

2) F. Paschen, Ann. d. Phys. 33. p. 736 ff. 1910.

menge zu messen, mußte ich die Elemente anders anordnen und größere Dimensionen wählen.[1]) Der Rahmen hat einen Durchmesser von 5,6 cm, der ausgebrochene Mittelraum ist $2{,}0 \times 3{,}0\,\text{cm}^2$. Er war aus Gummon — einem Isoliermaterial der Isolatorenwerke Gräfelfing-München — gedreht und vor Montierung der Thermosäule unter der Luftpumpe in heißem Kolophonium gebadet. Er zog dann keine Feuchtigkeit mehr an und behielt dauernd seine Isolierung, was bei Schiefer nicht der Fall war. Elfenbein erwies sich gleichfalls als unbrauchbar, weil es sich ungleich zieht und so die Thermosäule zerstört. Die Schrauben für die Galvanometerzuleitungen (G_1 G_2) lagen auf der Seite. Die Elemente waren aus 0,1 mm Fe-Draht

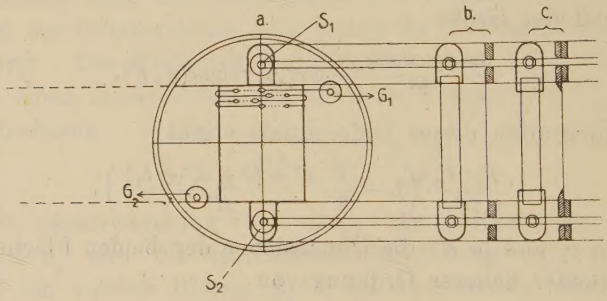


Fig. 1.

und 0,08 mm Konstantandraht (bezogen von W. C. Heraeus in Hanau) mit möglichst wenig Silber hartgelötet und mit einer Strahlwalze so dünn als möglich — ca. 2 μ — ausgewalzt. Nur wenn minimale Mengen von Silber zum Löten verwandt waren, gelang es so dünne Elemente, die vollkommen gerade waren, zu erhalten. Die Anordnung der hintereinander geschalteten Thermoelemente ergibt sich aus Fig. 1. Die Länge des Konstantans war so bemessen, daß die nicht bestrahlten,

1) Die ersten Versuche waren mit kleinen Paschenschen Thermosäulen, wie sie zu Spektralzwecken dienen, ausgeführt. Wegen der Schwierigkeit der Messung einer sehr kleinen bestrahlten Fläche und des kleinen Widerstandes der Streifen, und wegen der geringen Strahlungsgröße gaben die Versuche nur auf einige Prozente übereinstimmende Werte, jedoch so, daß die Aufwendung größerer Mittel zur exakten Messung aussichtsvoll erschien. (Vgl. hierzu Tab. III.)

auf konstanter Temperatur zu haltenden Lötstellen in einer Reihe lagen. Die mittleren Lötstellen waren möglichst gleichmäßig auf einen Raum von 3 mm Breite verteilt. Auf der ganzen Länge von 30 mm waren 45 Elemente montiert, alle parallel ohne sich zu berühren; die Thermosäule hatte einen Widerstand von 47 Ω; sie war mit Petroleum–Kampfer–Ruß nach der Methode der kalten Berußung[1]) geschwärzt.

Die Meßstreifen waren aus Manganinblech gewalzt, weil Manganin neben einem zu vernachlässigenden Temperaturkoeffizienten äußerst geringe Thermokräfte gegen Kupfer gibt. Es gelang nach vielen Versuchen, manchmal sogar Bleche von 1—2 μ Dicke zu erhalten, aus denen sich Streifen mit einem Rasiermesser schneiden ließen, die noch keinerlei durchsichtige Stellen hatten. Das Blech wurde zwischen Manganinblech ausgewalzt, ohne daß es geglüht wurde, denn beim Ausglühen oxydierten die Streifen. Es wurden Streifen von 1—2 μ bis zu ca. 12 μ Dicke verwandt. Nachdem sie vorsichtig geschmirgelt und poliert waren, wurden sie mit Tinnol auf kleine Kupferplättchen aufgelötet (Fig. 1, b und c), so daß die Streifen, wenn die Kupferplättchen auf die mit Schraubengewinde versehenen in den Rahmen eingelassenen Kupferstücke (S_1 und S_2) aufgeschraubt waren, glatt in einer Entfernung von einem halben Millimeter über der Thermosäule lagen, durch Luft von dieser isoliert. Bei der Anordnung Fig. 1 b reichte der Meßstreifen vom ersten bis zum letzten Thermoelement, bei Anordnung Fig. 1 c ragte ein ca. 1 mm dickes Kupferblech noch über eine oder zwei Lötstellen hin; dann wurden auch die äußersten Teile des Streifens durch Thermoelemente kontrolliert; das Kupfer erwärmt sich weder bei Bestrahlung noch bei Stromheizung (vgl. unten). Die Entfernung der Schraubenkontakte G_1 und S_1 bzw. G_2 und S_2 mußte möglichst groß gewählt werden, um einen Nebenschluß zu den Streifen durch Thermosäule und Galvanometer auszuschließen. Der Widerstand zwischen Streifen und Thermosäule war größer als 10^{10} Ω. Vollkommene Isolation zwischen Streifen, Thermosäule und Gehäuse wurde vor jeder Messung geprüft.

---

1) O. Lummer u. F. Kurlbaum, Zeitschr. f. Instrumentenk. **12.** p. 81. 1892.

Die Meßstreifen wurden mit Platinmoor geschwärzt, teils nach Kurlbaumschem[1]) Rezept, teils durch Elektrolyse von H_2PtCl_6 ohne Bleiacetatzusatz, wobei die Streifen nach der Platinierung einen Stich ins Braune hatten, aber gleichwohl samtartiges Aussehen zeigten. Der Streifen für eine Messung wurde, um für spätere Messungen eine reproduzierbare Schwärze zu erhalten, mit einer frisch angesetzten Lummer-Kurlbaumschen Lösung (5 g Platinchlorid von Heraeus, 150 g Wasser, 0,040 g Bleiacetat) platiniert. Als Elektrolysegefäß diente ein viereckiger Glastrog, als Anode zwei gegenüber liegende Platinstreifen, als Kathode der zu schwärzende Streifen, welcher frei zwischen den Platinelektroden und parallel zu ihnen hing, so daß der Streifen beiderseitig gleichmäßig geschwärzt wurde. Nachdem der aufgelötete Streifen mit konzentrierter Sodalösung von Fett gereinigt und in Wasser gut abgespült war, wurde er bei 4 Volt Spannung und 0,031 Amp. cm^{-2} Stromdichte 6 Minuten lang platiniert.

Die Stromstärke war nach gleichförmiger mäßiger Gasentwickelung bemessen und wurde während der Elektrolyse durch einen Schieberwiderstand dauernd konstant gehalten. Der Streifen hatte dann, nachdem er in Wasser abgespült und getrocknet war, ein reines, samtschwarzes Aussehen und zeigte mit der Lupe in Sonnenlicht betrachtet keinerlei glänzende Pünktchen, wie sie oft infolge sich festsetzender Gasbläschen beobachtet werden. Durch Baden in Alkohol vor dem Trocknen verliert der Streifen leicht sein samtschwarzes Aussehen.

Dicht über den seitlichen Lötstellen lagen breite Streifen Kupferblech. Der Raum hinter der Thermosäule war durch eine Metallplatte, die ca. 1 mm hinter den Elementen saß, begrenzt. Erst dann stand das Galvanometer dauernd konstant. Schließlich wurde die Metallplatte noch versilbert, so daß die zwischen den Lötstellen der Thermosäule durchgehende, vom Streifen ausgesandte Strahlung auf erstere reflektiert wurde. Hierdurch wurde der Ausschlag der Thermosäule noch um einige Prozent vergrößert. Auf den Rahmen wurde das Spalt-

1) Vgl. F. Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Phys. XI. Aufl. p. 40.

gehäuse aufgeschraubt, das genau nach Angaben von F. Paschen [1]) hergestellt war. Der scharfkantige Ausschnitt war $10{,}5 \times 34{,}0\,\text{mm}^2$. Thermosäule mit Spalt paßten in ein weiteres Messinggehäuse mit $12{,}5 \times 36\,\text{mm}^2$ großem Spalt, der Deckel trug vier mit Hartgummi isolierte Durchbohrungen für Strom- und Galvanometerzuleitungen.

Als Hauptdiaphragma diente ein scharf geschliffener Spalt mit Stahlbacken (großer Spalt eines Spektrometers); die größere Kante stand vertikal; die horizontale Begrenzung wurde durch zwei in die abgeschrägten vertikalen Backen passende ebenfalls geschliffene Messingstücke gebildet. Das Diaphragma war fest an einen Wassertrog angedrückt, die Dimensionen seiner Öffnung waren mehrmals bestimmt worden und stets unverändert befunden, sie betrugen

$$F_1 = 4{,}504 \times 0{,}7783\,\text{cm}^2 = 3{,}5056\,\text{cm}^2.$$

Der Thermosäulenspalt F_2, der die Streifen nur seitlich begrenzte, während ihre ganze Länge bestrahlt wurde, war in zwei verschiedenen Anordnungen hergestellt: bei Versuchsreihe II [2]) war er analog dem Hauptdiaphragma von geschliffenen und polierten versilberten Messingbacken begrenzt, die abgeschrägten Kanten zum Streifen gewandt. Als ein besonderer Versuch gezeigt hatte (vgl. Vorversuche), daß sich Kupferschablonenblech, beiderseitig gut versilbert und glänzend poliert, in den benutzten Entfernungen nicht mehr merklich erwärmte, wurde die Begrenzung aus solchem Blech verfertigt. Ein derartig hergestellter Spalt läßt sich nämlich durch leichtes Drehen und Verschieben der mit einer Spur Kolophonium aufgeklebten Backen jeder Lage des Meßstreifens anpassen. Mittels eines Zeissschen Komparators ließ sich die Breite des Spaltes auf weniger als 0,1 Proz. genau ausmessen. Es gelang selten, den Spalt genau parallel zu machen; stets stimmten aber die aus den Randdimensionen berechneten Mittel mit den in der Mitte des Spaltes gemessenen Werten überein. Die Dimensionen waren:

---

1) F. Paschen, Ann. d. Phys. **33**. p. 736. 1910 u. Taf. IV.
2) Vgl. Tab. VII.

Tabelle I.

Nr.	Breite (cm)	Länge (cm)	Fläche (cm^2)	Verwandt in Messung	Für Streifen Nr.
1	0,28705	2,7082	0,7775	II. 4, 5, 6	I
2	0,37097	2,7823	1,0321	III. 1, 2, 4	I
3	0,38957	2,7734	1,0804	IV. 2	IV
4	0,31923	2,7525	0,8788	IV. 5, 6. V. 1	IV, VII, VIII
5	0,37028	2,7854	1,0313	V. 2	VIII
		Streifenlänge			
6	0,34207	2,663	0,9110	VII. 1	IX
7	0,34207	2,739	0,9388	VII. 3, 4	IX
8	0,30739	2,739	0,8422	VII. 5	IX
9	0,36474	3,0822	1,1243	VIII. 1, 2, 3	VIII
10	0,35337	3,0538	1,0791	IX. 2,3	Ia
11	0,34459	3,0804	1,0615	X. 2, 3, 4, 5	III
12	0,37014	2,7555	1,0200	XI. 1	X

Für die Messungen hatte sich folgende Anordnung als günstigste ergeben:

Die schwarzen Strahler S standen hinter einem mit Ausschnitt versehenen schmalen Wassertrog W, auf dessen anderer Seite das Hauptdiaphragma D angebracht war. In beliebigen Entfernungen standen zwei große Metallschirme b_1 b_2 mit Blenden mit abgeschrägten Rändern, vor diesen die Thermosäule, die in einem Holzgehäuse mit einer Messingklammer festgehalten, unveränderlich auf dem Tisch einer Teilmaschine T justiert war, um jederzeit während eines Versuches die Entfernung meßbar ändern zu können. Zwischen b_2 und der Thermosäule war ein Blendengehäuse B eingeschaltet.

Die Vorderseiten aller Blenden waren glänzend, die der Thermosäule zugewandten Seiten und Kanten gut mit Ruß geschwärzt, so daß keine reflektierte Strahlung in die Thermosäule gelangen konnte, was bei jeder neuen Aufstellung geprüft wurde. Öffnung der schwarzen Körper, Hauptdiaphragma, Blenden und Thermosäule waren zueinander parallel und so symmetrisch angeordnet, daß eine Verschiebung des Schlittens der Teilmaschine in der Strahlenrichtung keine seitliche Verschiebung hervorrief. Die schwarzen Körper standen in fester

Lage auf einem Schlitten, welcher auf Schienen leicht hinter der Wasserklappe hin und her bewegt werden konnte. Die Hohlraumöffnungen füllten das Hauptdiaphragma voll aus, Strahlung konnte nur aus ihrem Innern zu der Thermosäule gelangen. Anschläge an den Schienen rechts und links bezeichneten die Justierung des 0° bzw. 100° schwarzen Körpers vor dem Diaphragma. Schlitten, Wasserklappe und Teilmaschine waren auf gemauerter, nicht miteinander verbundener Unterlage fest montiert, so daß beim Umlegen des

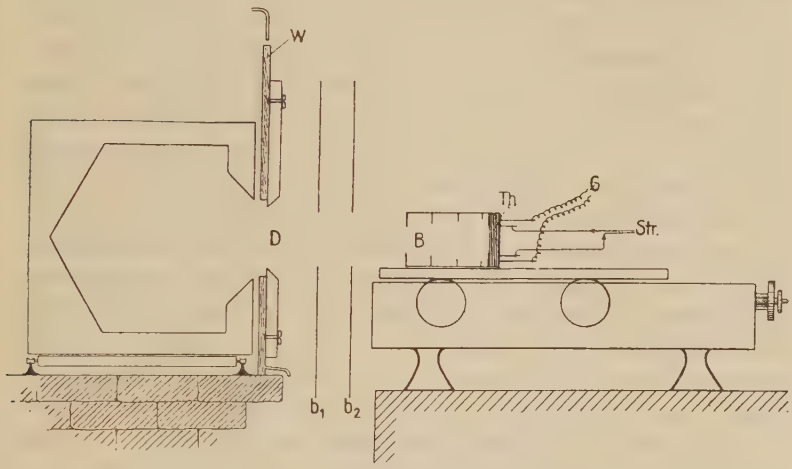


Fig. 2.

Schlittens keine Erschütterungen oder Justierungsänderungen erfolgten.

Die kürzeste Entfernung R von der Ebene des Hauptdiaphragmas bis zur Ebene des Thermosäulenspaltes wurde folgendermaßen gemessen:

Die Dicken des Diaphragmas sowie des Spaltgehäuses wurden mit einem Sphärometer bestimmt. Zur Messung des Abstandes (kürzeste Entfernung R!) von der Rückseite des Diaphragmas bis zur Vorderseite des Spaltgehäuses diente ein aus einer Schublehre hergestelltes, mittelst Maßstab und Nonius meßbar verschiebbares Stichmaß, dessen Eigenlänge unter der Teilmaschine gemessen war. Das Stichmaß wurde, fast auf die richtige Entfernung eingestellt, horizontal zwischen Dia-

phragma und Thermosäule auf den Schlitten der Teilmaschine gelegt, so daß die eine Spitze die markierte Mitte des Spaltgehäuses berührte. Die Verschiebung bis zur Berührung der anderen Spitze mit der Mitte des Diaphragmas wurde durch Drehung der Spindel der Teilmaschine bewirkt, die Berührung selbst durch Schließen eines elektrischen Kontaktes empfindlich festgestellt. Verschiebungen zu Messungen in verschiedenen Entfernungen wurden an dem Maßstab der Teilmaschine mit einem Mikroskop abgelesen.

Zur Konstruktion der schwarzen Körper von 0^0 und 100^0 benutzte ich im wesentlichen die Valentinerschen Angaben.[1]) Ein Parallelepipedon mit aufgesetzter Pyramide als Hinterwand und aufgesetztem Pyramidenstumpf als Vorderwand aus Zinkblech bildete den Hohlraum. Seine Dimensionen waren $12 \times 18 \times 20$ cm, inklusive Ansätze hatte der Hohlraum eine Länge von 28 cm. Die Öffnung beider Strahler war 2×9 cm^2. In einem doppelten Dampfmantel eingesetzt wurde er von Dampf von siedendem Wasser umspült, der an zwei Stellen (oben links und unten rechts) eintrat. Sowohl aus dem inneren wie äußeren Dampfmantel führten Röhren nach außen, um kondensiertes Wasser abzulassen. Aus dem äußeren Mantel trat der Dampf durch einen kurzen weiten Gummischlauch in einen Liebigschen Kühler, aus dem das Kondenswasser abfloß.

Die fast 2 m langen Zuleitungen des Dampfes, der aus einem in einer Kiste stehenden großen Dampfkessel kam, bestanden aus Messingröhren 17 mm lichter Weite, die vollkommen Wärme-isoliert waren, desgleichen war der schwarze Körper von 100^0 mit Watte und Asbest dicht umkleidet, so daß kaum Wärme nach außen gelangte. Die von Dampfkessel und Heizbrenner aufsteigende erwärmte Luft wurde in einem weiten Trichter aufgefangen und mit einer Wasserstrahlpumpe abgesaugt. In die Dampfleitung war ein Stück weiten Gummischlauchs eingesetzt, welcher beim Umlegen des Schlittens das Mitdrehen des Dampfrohres gestattete. Der schwarze Körper 0^0 bestand aus gleichem Hohlraum, der in einen weiten Kasten eingesetzt war, rings mit klein geschlagenem Natureis und

1) S. Valentiner, Ann. d. Phys. **31**. 1910. Vgl. Zeichnung auf p. 212.

Schmelzwasser umgeben. Im Innern waren beide Hohlräume mit Ruß geschwärzt; eine gute Berußungsflamme lieferte gesättigte Kampferlösung in Petroleum und Terpentin zu gleichen Teilen. Schon in dünnsten Schichten erhält man dann eine festsitzende schwarze Rußschicht.

Die Thermosäule war mit einem Paschenschen Eisengalvanometer[1]) verbunden. Abgesehen davon, daß es gegen äußere Störungen nicht gänzlich geschützt war, war es trotz seines kleinen Widerstandes von 10 Ω in hohem Maße für meine Messungen geeignet. Die Empfindlichkeit betrug bei 4 m Skalenabstand und 7,5″ ganzer Schwingungsdauer pro Skalenteil 8×10^{-10} Amp. Der Nullpunkt blieb dauernd konstant, nach Einstellung in die Ruhelage fand keinerlei Nachwandern statt. Die Ablesungen sind auf 0,1 Skt. sicher. Temperaturänderungen im Zimmer verursachten keinerlei Empfindlichkeits- oder Justierungsänderungen; weder das Umlegen der schwarzen Körper noch Einschalten eines Stromes bei geöffnetem Galvanometerkreis riefen einen Ausschlag hervor.

Die Anordnung zur Messung des Kompensationsstromes war folgende (Fig. 3.)

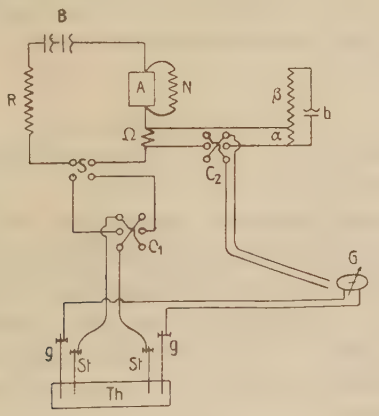


Fig. 3.

Es bedeutet:

B zwei Akkumulatoren.

R ein Stöpselrheostat.

1) Vgl. z. B. F. Paschen u. K. Wolff, Phys. Zeitschr. **12.** p. 114. 1911. Anm.

S Stromschlüssel (Quecksilber).
c_1 c_2 Pohlsche Wippen.
Ω ein Normal-Ohmstück, beglaubigt von der Phys.-Techn. Reichsanstalt.
A Großes Siemens-Halske-Amperevoltmeter.
N Nebenschluß zu A (vgl. nachstehenden Text).
G Paschensches Eisengalvanometer.
$Th\,St$, $Th\,g$ Strom- und Galvanometerleitungen an der Thermosäule.
α, β ein großer Wolffscher Widerstand (50000 – 0,1 Ω).
b ein geeichter Akkumulator (vgl. nachstehenden Text).

Der Heizstrom war mit R regulierbar und wurde am Amperemeter A abgelesen. Da die Ampereskalen der zur Verfügung stehenden Instrumente mir nicht genügend empfindlich waren, legte ich der Voltschaltung ($1^0 = 0{,}02$ Volt, 283 Ω Systemwiderstand) einen passenden Widerstand parallel (N), — aus Manganindraht gewickelt, nach dem bekannten Verfahren gealtert und in Petroleum aufbewahrt —, und aichte mir diese Anordnung nach Ampere durch Kompensation der Spannung an einem dauernd im Stromkreis liegenden Normalohm mit einem gegen ein Westonelement[1]) geeichten Akkumulator. Der Widerstand N war so bemessen, daß die Ablesung stets zwischen 100 und 150 Skt. erfolgte; die Eichung und Ablesung war genau bis auf mindestens ein Promille. Sie wurde bei 12^0 und 20^0 unverändert gefunden, und blieb während der ganzen Versuchsdauer konstant. Die Messungen fanden meist bei 18^0 statt.

§ 3. Vorversuche.

Damit die Meßmethode brauchbar sein sollte, mußten die Bedingungen erfüllt sein:

1. Schnelle und konstante Einstellung der Thermosäule bei Bestrahlung und Heizung des Meßstreifens; Rückkehr in die ursprüngliche Ruhelage bei Aufhebung der Heizung und Strahlung, wenn keine Störung einen Gang verursachte.

2. Proportionalität der Thermoströme, bzw. der korrigierten Galvanometerausschläge mit der elektrischen Heizung $i^2 w$ des Streifens.

---

1) Die elektromotorische Kraft unseres Westonelementes, angegeben zu 1,0190 Volt, verglich ich mit einem neuen geprüften Doppelelemente, das mir Hr. Magnus vom phys.-chem. Institut zur Verfügung stellte ($e = 1{,}01875$) und fand für unser Element 1,01855 Volt, in Übereinstimmung mit der Bekanntmachung der Physik. Techn. Reichsanstalt (vgl. E. Warburg, Verhandlg. d. phys. Ges. 1910. p. 1050).

3. Proportionalität mit der Größe der bestrahlten Streifenfläche.

4. Unabhängigkeit der Messung von den gewählten Dimensionen der Meßstreifen.

Die erste Bedingung war erfüllt, nachdem die Thermosäule, wie oben beschrieben, ringsum mit Metall umgeben war. Die Ausschläge waren spätestens nach 20—30 Sekunden, zum weitaus größten Teile nach 10—20 Sekunden nach dem Umlegen der Strahlungskörper beendet. Nach gleicher Zeit erfolgte die Einstellung bei Heizung, sowie die Rückkehr in die Ruhelage.

Bedingungen 2 und 3 waren, wie einzelne Vorversuche und die unter in weiten Grenzen variierten Bedingungen erhaltenen Versuche beweisen, innerhalb der Messungsfehler erfüllt. Mit der kleinen Thermosäule (vgl. Anm. p. 6) z. B. erhielt ich:

Tabelle II.

Proportionalität des Ausschlages a mit der Spaltbreite s.

Streifen	Spaltbreite	a/s (relativ)	
1	1,517 mm	965	Streifenbreite 2 mm
	1,280 „	969	
	0,664 „	968	
2	1,582 „	130	Streifenbreite 1,8 mm
	0,756 „	131	

Tabelle III.

Proportionalität des Ausschlages a mit der Stromwärme $E = i^2 w$.

Streifen	Strom	a/E (relativ)
1	0,0244	368
	0,0263	369
	0,0283	370
2	0,01537	287
	0,01741	285
	0,02028	285
3	0,0132	368
	0,0164	370
	0,0201	369
	0,0278	368

Abweichungen von der Proportionalität mit der Spaltbreite traten auf, wenn die Spaltblende zu dicht über dem Streifen lag; sie wurde durch Abrücken des Spaltes auf 1 mm Entfernung wiederhergestellt, wie folgende Zahlen zeigen:

Tabelle IV.

Streifenbreite 4,0 mm.

Spaltlage	Dicht vor dem Streifen		ca. 1 mm entfernt
Spaltbreite	0,3896 cm	0,3192 cm	0,3192 cm
$\frac{i^2 w}{F_2}$ (relativ)	650	681	648

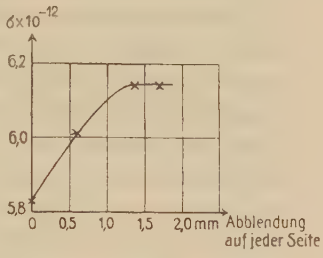
Diese Zahlen sind aus vollständig durchgeführten Messungen gewonnen.

Die Abweichung bei zu naher Blende rührt wohl daher, daß die abblendenden Teile des Spaltes durch ihre Nähe zum Streifen von diesem Wärme ableiten. Bei Bestrahlung wird in den abgeschirmten Teilen keine Energie absorbiert, und daher auch weniger abgeleitet, während bei Heizung des Streifens auch an diesen Stellen Joulesche Wärme abgelagert wird, von der ein Teil durch die äußere Ableitung verloren geht. Um diesen Teilbetrag muß dann das zur Erzeugung der gleichen Temperaturerhöhung wie bei Strahlung benutzte $i^2 w$ größer sein, als jener entspricht.

Während ein seitliches Abblenden also zulässig war, zeigte sich eine Abblendung des Streifs an den beiden Kupferzuleitungen als fehlerhaft. Fig. 4 stellt das Messungsresultat dar, das ich fand, als ich Streif Nr. VIII oben und unten um wachsende Beträge abblendete. Bei vollkommen bestrahltem Streif ergab er für die Strahlungskonstante 5,83 (vgl. Tab. VIII, Nr. 5—7). Bei Abblendung um nur 1,4 mm auf jeder Seite änderte sich das Meßresultat in 6,14 (vgl. Tab. VII, Versuch V, 1). Weitere Abblendung änderte diesen Wert nicht, verhält sich also wie die seitliche Abblendung (vgl. Tab. VII, Versuch V, 2).[1]) Daraus folgt, daß das Gebiet, aus dem noch Wärme durch

1) Vgl. auch die Werte der Tab. VII mit Tab. I: Konstanz der Resultate bei verschieden großer Längsabblendung.

innere Wärmeleitung in die Zuführungsschienen fließt, oben und unten ca. 1,4 mm Streifenlänge umfaßt, wenn man folgende Deutung der gefundenen Resultate annimmt: Die an die Schienen grenzenden Teile des Streifens verlieren die zugeführte Energie um so mehr, je näher sie den Schienen liegen, durch innere Wärmeleitung. Um so weniger wird sich ihre Temperatur ändern. Die dahinter liegenden Thermolötstellen empfangen die durch innere Leitung fortgehende Wärme nicht. Blendet man die Strahlung von diesen Teilen ab, so wendet man doch die in ihnen produzierte Joulesche Wärme auf. Um den Betrag dieser Jouleschen Wärme, der durch metallische Leitung fortgeht und daher von den Lötstellen nicht gemessen wird, erscheint die Strahlungsgröße zu groß.



Meßstreifen Nr. VIII.

Fig. 4.

Bei unabgeblendeter Längsrichtung ist zu erwarten, daß sich bei Strahlung dasselbe Temperaturgefälle der Streifenenden einstellt wie bei Heizung. Ein Unterschied ist dadurch bedingt, daß die zugestrahlte Wärme von der Oberfläche des Streifs in den Endquerschnitt geleitet werden muß, bei elektrischer Heizung aber der Leitungsweg um ein geringes kürzer ist. Diese Unsicherheit haftet übrigens auch der Kurlbaumschen Methode an und bedingt einen zu großen Wert von σ. Die Verhältnisse sind ähnlich, wie bei dem Temperaturunterschied zwischen der bestrahlten Oberfläche und dem Metallstreifen selbst. Daß der Fehler unbedeutend ist, ergibt sich aus zwei Tatsachen:

1. Verschieden dicke Streifen ergeben dasselbe Resultat.

2. Ein Streif wurde oben und unten nicht *auf* einem Kupferblock, sondern *zwischen* zwei Kupferblöcken gehalten (Fig. 1 c), ohne daß das Resultat sich änderte. — Ich habe mich deshalb bei den definitiven Messungen darauf beschränkt, zu zeigen, daß die geringe Abblendung seitlich, welche zur exakten Messung der Breite von F_2 und zur Beschirmung der Thermosäule erforderlich ist, keinen Fehler gibt. Als Längsdimension

wurde die Entfernung der beiden Kupferstücke gemessen und ihre Projektion auf die Spaltebene in Rechnung gesetzt. — Die Messung war bis auf 0,3—0,5 Proz. möglich.

Durch weitere Versuche war gezeigt worden, daß das Resultat und die Empfindlichkeit der Anordnung unabhängig von der Dicke der Meßstreifen ist.

Ferner ergaben schmale Streifen, die gerade die Lötstellen bedeckten, und breitere, die seitlich je $^1/_2$ mm beiderseits darüber hinausstanden, gleiche Werte, falls der Streifen symmetrisch zu den Lötstellen lag. Lediglich die Zeit der Einstellung änderte sich mit der Dicke. Die dünnsten Streifen nahmen nach 20 Sek., die dicksten erst nach 30 Sek. konstante Temperatur an. Zweifellos waren die 1—2 μ-Bleche ungleich dick; denn die Stücke, aus denen sie geschnitten waren, zeigten an vielen Stellen feine Löcher, nicht aber die Streifen selbst, wie ausdrücklich nochmals betont sei. Meine Anordnung gibt also auch mit ungleichmäßigen Streifen dieselben Werte wie mit gleichmäßig dicken, als welche man die von 6—7 μ wohl ansehen darf. Dies ist in Übereinstimmung mit den Erörterungen von Prof. Paschen.[1])

Die schwarzen Strahlungskörper von 0 und 100° waren in doppelter Hinsicht geprüft. Nachdem mit einem zwischen 0 und 100° besonders geeichten Fe-Konstantanthermoelemente die Gleichheit der Temperatur im Dampf des Kessels mit der in den beiden Dampfmänteln des 100°-schwarzen Körpers nachgewiesen war, wurde mit dem gleichen Thermoelemente die Temperatur der inneren Wandung des Strahlungshohlraumes bestimmt und an allen Stellen gleichmäßig und gleich der im Dampfkessel befunden. Auch im schwarzen Körper von 0° war an allen Stellen gleichmäßige Temperatur. Außer der Temperatur wurde die Strahlung der beiden Hohlräume untersucht. Ich ließ dazu verschiedene Teile derselben auf eine Thermosäule mit kleinem Öffnungswinkel strahlen; hierbei ergab die Strahlung aller Teile bei beiden Körpern übereinstimmende Resultate. Die Bedingung einer schwarzen Strahlung konstanter, exakt gemessener Temperatur war also bei den Messungen erfüllt.

1) F. Paschen, Ann. d. Phys. 38. p. 30. 1912.

Eine Erwärmung des Hauptdiaphragmas oder des Thermosäulenspaltes war nicht nachweisbar. Wurde der Spalt mit einem beiderseitig versilberten Kupferblech (aus gleichem Stück wie die Spaltbacken geschnitten) bedeckt, so änderte die Thermosäule bei Bestrahlung ihre Ruhelage nicht. Wurde das Hauptdiaphragma mit einem beiderseitig geschwärzten Blech bedeckt, so gab die Thermosäule bei Vertauschung der Strahlungskörper einen Ausschlag von 0,5 Proz. des vorherigen Strahlungsausschlages, dagegen überhaupt nichts, wenn dieses Blech nicht schwarz war. Auch lieferten Beobachtungen mit Klappe an dem schwarzen Körper und ohne Gebrauch einer Klappe gleiche Werte, so daß eine Eigenstrahlung des Diaphragmas ausgeschlossen war.

§ 4. Verlauf einer Messung.

Nachdem die in beschriebener Weise aufgestellte Thermosäule sich austemperiert hatte — Klemmen, Zuleitungen und Blendengehäuse waren zum Schutz gegen äußere Einflüsse mit Seide und Watte umhüllt — wurde der schwarze Körper 100° angeheizt, der von 0° mit Eis und Wasser umgeben. Durch Öffnen einer nahe dem Dampfkessel befindlichen Tür konnte die Zimmertemperatur konstant gehalten werden, so daß die Nullage des Galvanometers während einer Messung sich nicht wesentlich änderte. Mit den Messungen wurde erst dann begonnen, wenn aus dem Kondensationsrohr des 100°-schwarzen Körpers tropfenweise Wasser abfloß, was sich durch Regulierung des Gasdruckes im Heizbrenner leicht erreichen und während einer Messung halten ließ. Im folgenden gebe ich nun ein Beispiel einer Messung mit allen Zahlen:

25. I. 1912 abends.

Barometer zu Anfang des Versuches	725,06
„ „ Ende „ „	725,06
Temperatur abs. des „schw. K. 100°“	371,69.

Abstand R	35,68 cm
Breite des Spaltes . . .	0,37014 cm
Länge des Streifens . . .	2,7555 cm

Widerstand des Streifens $w = 0{,}1139\ \Omega$.

Galvanometrische Messung:

Strahlungsmessungen.

Schw. K. 100°.

Zeit	Galv.
0″	399,0
15	399,1

Schw. K. 0°.

30″	592,0
45	594,5
0	95,8
15	96,0
30	96,0

Schw. K. 100°.

45″	405
0	1,3
15	0,2
30	399,4
45	99,7
0	99,0
15	98,8

Schw. K. 0°.

30″	589
45	93,9
0	95,6
15	95,0
30	95,0
45	94,6
0	94,3
15	94,8

Schw. K. 100°.

30″	404,0
45	397,9
0	97,2
15	96,0
30	96,3
45	95,5

usw.

Strommessungen:

Schw. K. 0°.

Zeit	Galv.
45″	591,4
0	91,6

Strom: Amp. 126,2 Skt.

Kommutatorlage I.

15″	394
30	93,7
45	92,7
0	92,7
15	92,2
30	92,2

Strom aus, schw. K. 0°.

45″	590,2
0	91,0
15	91,0
⋮	Störung
30	92,0
45	93,0

K. I. Strom: 126,2 Skt.

0″	396,0
15	94,9
30	94,5
45	94,4

Strom aus, schw. K. 0°.

0″	591,0
15	92,8
30	93,0
45	93,2
0	94,0

K. II. Strom: 126,2 Skt.

15″	396
30	95,2

Zeit	Galv.
45″	94,4
0	94,0
15	94,2
30	94,0

Strom aus, schw. K. 0°.

45″	592,0
0	93,0
15	93,9
30	94,1
45	94,0
0	94,1

K. II. Strom: 126,2 Skt.

15″	396,0
30	95,3
45	95,1
0	95,0

Strom aus, schw. K. 0°.

15″	593,4
30	95,0
45	96,1
0	96,3
15	96,1

usw.

(Vgl. Kurven Fig. 5.)

Die graphische Berechnung liefert die Werte:[1])

Strahlungsbeobachtungen:

Einzelwerte	197,0	195,8	198,8	195,1	197,6	196,0	**196,8**	**196,8**
Mittelwerte		196,4	197,3	196,85	196,35		196,4	196,8
Einzelwerte	**196,9**	**197,5**	195,7	197,5	197,6			
Mittelwerte		197,2	196,6	196,5	197,55			

Strombeobachtungen:

K. I.

Einzelwerte	198,40	198,1	**198,0**	**198,8**	**198,50**	**198,7**
Mittelwerte		198,25	198,05	198,4	198,65	198,60

K. II.

Einzelwerte	**200,0**	**200,0**	**198,9**	**200,5**	199,0	200,0
Mittelwerte		200,0	199,45	199,70	199,75	199,50

Mittel der Strahlungsbeob.: 196,80

„ „ Strombeob.: 199,04 { beob. Strom: 126,2 Skt. − 0,024724 A.
ber. Strom: 0,024584 Amp.

σ = (unkorr.) 5,692 = (korr.) 5,745 Watt cm^{-2} $Grad^{-4}$.

Über die Ausführung dieser Messungen sei folgendes gesagt. Die Thermosäule wurde mit dem 100°-schwarzen Körper bestrahlt, und die Galvanometerstellungen von 15″ zu 15″ notiert. Nach meist $1^1/_2$—2 Min. langer Beobachtung legte ich die Strahler um und beobachtete die Einstellungen bei 0° in gleicher Weise. So wurde mehrere Male hin und her vertauscht, wobei der Gebrauch einer Klappe, der leicht Fehler bringt und vor allem doppelte Anzahl von Ablesungen erfordert, umgangen war. Während der 0°-schwarze Körper auf die Thermosäule strahlte, wurden die Heizungsausschläge auf gleiche Weise beobachtet und registriert, bei jeder Kompensationsmessung außerdem Ablesung am Amperemeter und Lage des Kommutators (C_1 in Fig. 2) notiert. Die so erhaltenen Galvanometereinstellungen wurden in großem Maßstabe in Koordinatenpapier eingetragen (Fig. 5). Wenn ein Gang,

1) Die fett gedruckten Zahlen sind die Resultate der angeführten Beobachtungen.

d. h. keine konstante Einstellung, vorhanden war, so wurde dieser graphisch eliminiert: der nach der Einstellungszeit vorhandene Gang — in den Kurven fast immer durch eine *schräge* gerade Linie ersichtlich — wurde von den Notierungen der ersten Minute abgezogen. Es wurde stets die Differenz der letzten Ablesung einer Messung und des Schnittpunktes der rückwärts verlängerten „Gang"-Geraden der darauf folgenden Messung mit der Zeitordinate der ersteren als Ausschlag genommen und dann das Mittel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Beobachtungen gebildet. Diese stimmten gut überein,

Fig. 5.

stets auch solche Beobachtungen mit starkem Gang mit solchen ohne jeden Gang, was die Berechtigung der graphischen Korrektionsmethode beweist.

Der zur Kompensation dienende Strom erzeugte nicht immer den gleichen Ausschlag des Galvanometers, wenn er kommutiert wurde, obgleich die Ablesungen am Amperemeter dieselben waren und keinerlei Isolationsfehler vorlag. Diese Differenz glaube ich durch Peltier- und Thomsoneffekt an dem Übergang der Streifen zum Kupferplättchen erklären zu können. Denn die Differenz der Ausschläge wurde größer, je mehr ich den Streifen schief zu den Lötstellen legte, d. h. von der Seite betrachtet (stark übertrieben).

Vollkommen parallel zu den Lötstellen läßt sich der Streif ja überhaupt nicht legen, so daß die Differenz daher

kommt, daß das eine Mal Erwärmung, das andere Mal Abkühlung durch den genannten Effekt von den näher liegenden Lötstellen stärker gemessen wird auf der einen Seite als auf der anderen Seite. Das Mittel der Galvanometerausschläge war aber auch hier (auch bei größeren Differenzen bis zu einigen Prozenten) stets $i^2 w$ proportional; bei den definitiven Messungen war die Differenz stets kleiner als $\pm 0{,}5$ Proz., meist gar nicht merkbar.

Der einem Strahlungsausschlag a entsprechende Strom i wurde aus dem beobachteten Strom i' und zugehörigem Ausschlag a' berechnet nach

$$i^2 = i'^2 \frac{a}{a'} . \tag{3}$$

Verschiedene Ströme, welche Ausschläge $a' > a$ und $a' < a$ lieferten, ergaben denselben Wert i. Zur Kompensation eines Strahlungsausschlages $a = 313{,}9$ Skt. wurden drei Ströme i_1', i_2', i_3' verwandt, die Ausschläge a_1', a_2', a_3' ergaben. Die Abweichungen der aus ihnen nach Gleichung (3) interpolierten Ströme i liegen innerhalb der Fehlergrenzen der einzelnen Kompensationsmessung.

Tabelle V.

Meßstreifen Nr. III.

	Ströme i'	Ausschläge a'	Interpolierter Strom i	Diff.[1]) gegen Mittel
1.	0,024878	311,8	0,024962	+0,22 %
2.	0,024888	313,65	0,024898	−0,3
3.	0,025400	325,5	0,024944	+0,08
			Mittel: 0,024935	

Nach jeder Messung wurde der Widerstand des Meßstreifens aus der Spannung an seinen Enden, wenn er von einem Strom bekannter Größe — dem bei der betreffenden Messung gebrauchten Strom — durchflossen war, bestimmt,

1) Ich gebe direkt die doppelten Fehler an, wie sie, weil der Strom im Quadrat eingeht, im Resultat in Betracht kommen.

so daß der Widerstand für jede Stromstärke gemessen wurde. Obwohl man den Widerstand berechnete, maß man also tatsächlich die Spannung.

In Fig. 6 ist I die früher gegebene Kompensationsschaltung, II die Schaltung für die Messung des Widerstandes.

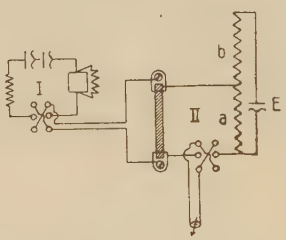


Fig. 6.

Ist e die Spannung an den Enden des Meßstreifens, und E ein geeichter Akkumulator, so ergibt sich der Widerstand aus

$$i\,w = e = \frac{a}{a+b}\,E,$$

wenn das Galvanometer stromlos ist.

Die Potentialdrähte waren dünne angelötete Manganindrähte, als Galvanoskop diente das sonst gebrauchte Eisengalvanometer.

Messungen wurden mit sieben Streifen ausgeführt, welche aus verschiedenen Blechen geschnitten waren. Variiert wurden bei den Messungen:

1. Thermosäulen,
2. Anordnung und Aufstellung,
3. Streifen (Blech, Dicke, Breite),
4. Platinierung,
5. Thermosäulenspalt,
6. Entfernung,
7. die Anordnung der Thermoelemente dadurch, daß Streifen solcher Breite, die gerade die Lötstellen bedeckten, und breitere verwandt wurden.

Die folgenden Tabellen geben die erhaltenen Resultate.

Tabelle VI.

Datum	Versuch	Entfernung	Spalt (cm^2)	Widerstand	Strom	$\sigma \times 10^{12}$
			I. Thermosäule, 17 Elemente.			
			Meßstreifen ca. 10 μ dick, 2 mm breit.			
23. I. 11	1	19,53	$1{,}556 \times 0{,}1775$	0,124		5,90
			II. Thermosäule, 23 Elemente.			
			Meßstreifen ca. 12 μ dick, 1,8 mm breit.			
6. VII. 11	2	18,73	$1{,}602 \times 0{,}1031$	0,0977	0,018151	6,00
6. VII. 11	3	18,73			0,018122	5,97
7. VII. 11	4	20,24			0,016618	5,86
7. VII. 11	5	20,24			0,016619	5,86
			Meßstreifen ca. 11 μ dick, 2 mm breit.			
14. VII. 11	6	19,43	$1{,}0602 \times 0{,}1031$	0,100	0,017166	5,89
16. VII. 11	7	16,67	$1{,}576 \times 0{,}1534$		0,020199	5,74
18. VII. 11	8	26,90			0,015002	5,90
					Mittel:	5,89

Tabelle VII.

Datum	Versuch	Entfernung	Spalt	Widerstand	Strom	$\sigma \times 10^{12}$	
			Meßstreifen I.				
			ca. 1—2 μ dick, 4 mm breit, mit älterer Lummer-Kurlbaumscher Lösung platiniert.				
22. X. 11	II. 4	26,61	I	0,1705	0,024397	6,141	6,135
24. X. 11	II. 5	26,61	I	0,1705	0,024476	6,165	
24. X. 11	II. 6	34,61	I	0,1707	0,018819	6,166	
31. X. 11	III. 1	32,73	II	0,1705	0,022837	6,102	
1. XI. 11	III. 2	32,73	II	0,1705	0,022897	6,121	
15. XI. 11	III. 3	30,73	II	0,1707	0,024355	6,117	
			Meßstreifen IV.				
			ca. 3—4 μ dick, 4 mm breit, mit $PtCl_4$+HCl geschwärzt.				
5. XII. 11	IV. 2	31,80	III	0,1437	0,026353	6,175	6,168
8. XII. 11	IV. 5	26,69	IV	0,1436	0,028237	6,161	
			Meßstreifen VII.				
			ca. 5—6 μ dick, 3,3 mm breit, mit $PtCl_4$+HCl geschwärzt.				
8. XII. 11	IV. 6	26,76	IV	0,1429	0,028082	6,099	6,099
			Meßstreifen VIII.				
			ca. 6 μ dick, 4 mm breit, mit neuer L.-K. Lösung geschwärzt.				
11. XII. 11	V. 1	30,62	IV	0,1222	0,026779	6,185	6,149
12. XII. 11	V. 2	32,78	V	0,1222	0,026963	6,113	
						Mittel:	6,14

Tabelle VIII.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14	15
Nummer	Datum	Versuch	Streifen	Entfernung	F_2 (Tab. I)	Widerstand	Strom	Galvanom.-Ausschlag Strahlung	Galvanom.-Ausschlag Heizung	Temp. abs.	Korr. %	Anzahl und Fehler der Strahlungs- und Strombeob.		$\sigma \cdot 10^{12}$	
1	6. I. 12	X. 2	III.	31,80	Nr. 11	0,2036	0,021281	256,6	259,1	371,37	0,6	7, ±0,3 %	10, ±0,16%	5,874	5,860
2	6. I. 12	X. 3	III.	31,80		0,2036	0,021386	259,1	259,1	371,37	0,6	2, ±0,15	10, ±0,16	5,931	
3	6. I. 12	X. 4	III.	38,80		0,2036	0,017392	176,4	177,1	371,16	0,4	12, ±0,47	6, ±0,26	5,854	
4	6. I. 12	X. 5	III.	38,80		0,2036	0,017397	176,5	177,1	371,16	0,4	4, ±0,00	6, ±0,26	5,857	
5	1. I. 12	VIII. 1	VIII.	32,62	Nr. 9	0,1272	0,027160	301,1	297,6	372,39	0,9	13, ±0,33	14, ±0,14	5,869	5,835
6	1. I. 12	VIII. 2	VIII.	42,62		0,1273	0,020609	173,5	171,7	372,42	0,5	5, ±0,24	6, ±0,41	5,745	
7	1. I. 12	VIII. 3	VIII.	42,62		0,1273	0,020635	173,9	171,7	372,42	0,5	4, ±0,19	6, ±0,41	5,760	
8	27. XII. 11	VII. 1	IX.	32,52	Nr. 6	0,1147	0,025595	234,9	231,3	371,93	1,0	5, ±0,25	6, ±0,26	5,812	5,773
9	29. XII. 11	VII. 3	IX.	32,68	Nr. 7	0,1190	0,025151	227,5	232,0	372,15	1,0	11, ±0,4	7, ±0,17	5,690	
10	30. XII. 11	VII. 4	IX.	32,68	Nr. 7	0,1191	0,025358	233,2	233,1	372,15	1,0	3, ±0,1	8, ±0,6	5,797	
11	30. XII. 11	VII. 5	IX.	29,68	Nr. 8	0,1192	0,026267	241,1	242,2	372,11	1,1	10, ±0,38	11, ±0,28	5,721	
12	25 I. 12	XI. 1	X.	35,68	Nr. 12	0,1139	0,024584	196,8	199,0	371,69	0,9	11, ±0,2	10, ±0,2	5,745	5,745
														Mittel:	5,803
13	4. I. 12	IX. 2	Ia[1]	31,74	Nr. 10	0,2032	0,021754	287,9	291,2	372,18	0,8	3, ±0,71	8, ±0,16	5,950	5,950
14	5. I. 12	IX. 3	Ia	41,82	Nr. 10	0,2032	0,016522	179,6	203,9	372,18	0,5	5, ±0,44	3, ±0,30	5,950	

1) d. h. Meßstreifen I neu geschmirgelt, bis er minimal dünn war und Löcher erhielt, sodann platiniert.

Zu ihnen sei folgendes gesagt: Die in Tab. VI enthaltenen Werte sind mit der anfangs erwähnten kleinen Anordnung gefunden. Sie haben keine große Sicherheit, weil abgesehen von der Unsicherheit bei der Messung der kleinen bestrahlten Fläche der Widerstand der Meßstreifen nicht aus der Spannung berechnet, sondern nach dem Kohlrauschschen[1]) Verfahren des „übergreifenden Nebenschlusses" gemessen wurde, eine Methode, die der ersteren an Genauigkeit nachsteht und nicht die Messung des Widerstandes bei Heizung mit dem im Versuch gebrauchten Strome gestattet. Immerhin zeigen die mit zwei Thermosäulen und verschiedenen Bedingungen erhaltenen Werte eine recht gute Übereinstimmung. Die Versuche von Tab. VII sind ausgeführt mit einer Abblendung oben und unten von je 1—2 mm. Nach Fig. 4 sind also diese Resultate um den konstanten Wert von 0,3 Watt $cm^{-2} grad^{-4}$ zu hoch (vgl. Versuche mit Meßstreifen VIII: Tab. VII, Versuch V, 1, 2 *mit* Abblendung; Tab. VIII, Versuch VIII, 1, 2, 3 *ohne* Abblendung). Ich gebe diese Versuche an, um an weiteren Beispielen die Unabhängigkeit des Resultates von den p. 22 erörterten Variationen zu zeigen.

Tab. VIII enthält die endgültigen Messungen. In Nr. 1—7 wurden Meßstreifen nach Fig. 1 b verwandt, in 8—12 solche nach Fig. 1 c. Nr. 8 ist insofern von 9—11 unabhängig, als nach Versuch VII. 1 die Lage des Meßstreifens etwas geändert und er neu platiniert wurde. Reihe 13 gibt die Anzahl der Strom- und Strahlungsbeobachtungen n und die mittleren Fehler ε, beide Größen ergaben in n/ε^2 das Gewicht der Einzelresultate in Reihe 14, aus welchen die Mittel (Reihe 15) gebildet wurden. Die Prozentzahl in Reihe 12 gibt die Summe der geometrischen Korrektion und der Projektion der Streifenlänge auf die Spaltebene.

Die beiden Messungen 13 und 14 sind mit einem Streifen gemacht, der an manchen Stellen durchscheinend war, an anderen auch nach der Platinierung Löcher hatte. Deshalb ist dieser Wert, dessen Abweichungen vom Mittel die Fehlergrenze übrigens kaum überschreiten, nicht zur Bildung des Resultates verwandt worden.

---

1) F. Kohlrausch, Wied. Ann. **20**. p. 76. 1883.

§ 5. Fehlerquellen.

1. Nur ein Punkt in meiner Anordnung entspricht wie bei Kurlbaum nicht der Theorie: Es ließ sich kein absolut schwarzer Empfänger verwenden. Wieweit eine platinierte Oberfläche schwarz ist, ist schon mehrfach untersucht worden, doch weichen die Resultate noch ziemlich stark voneinander ab. Ich werde deshalb das Reflexionsvermögen der von mir benutzten Meßstreifen für die in Frage kommenden Wellenlängen bestimmen. Nach den vorliegenden Messungen von K. Ångström[1]), F. Kurlbaum[2]) und Th. Royds[3]) wird man wohl 1—2 Proz. reflektierte Energie annehmen können. Die Féryschen Messungen, welche bedeutend höhere Werte für das Reflexionsvermögen geben, stehen bisher vereinzelt da. Es scheint hier[4])[5]) nicht bewiesen zu sein, daß die Wärmeableitung bei der gefalteten und glatten Lamelle die gleiche ist, auch ist es wohl nicht gleichgültig, ob die Thermolötstelle außen oder in einer Falte sitzt. Der Versuch Férys mit dem Differentialthermometer[6]) scheint ebenfalls wegen der verschiedenen Wärmeableitung der bestrahlten äußeren oder inneren Fläche nicht beweisend. Das gleiche kann wohl gegen die vergleichende Messung[4])[5]) der von einem Konus und von einer Fläche absorbierten Energie eingewandt werden.

2. Kohlensäure und Wasserdampf der Luft können durch Absorption von Strahlungsenergie die Konstante zu klein erscheinen lassen. Eine diesbezügliche Untersuchung werde ich ebenfalls in Angriff nehmen.

3. Die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Innerem des Empfängers, von Kurlbaum[7]) experimentell untersucht, beträgt nach den Erörterungen von F. Paschen[8]) unter

1) K. Ångström, Öfersigt of K. Vetensk-Akad. Förhandl. Stockholm **5.** p. 283. 1898.

2) F. Kurlbaum, Wied. Ann. **67.** p. 846. 1899.

3) Th. Royds, Phil. Mag. (VI) **21.** p. 167. 1911; Phys. Zeitschr. **11.** p. 316. 1910.

4) Ch. Féry, Compt. rend. **148.** p. 1043. 1909.

5) Ch. Féry, Ann. chim. phys. **13.** p. 267. 1909.

6) Ch. Féry, Compt. rend. **148.** p. 777.

7) F. Kurlbaum, Ann. d. Phys. **2.** p. 546. 1900.

8) F. Paschen, Ann. d. Phys. **38.** p. 30. 1912.

Annahme der Kurlbaumschen[1]) Messungen höchstens 3 Promille, um welchen Wert die Konstante zu vergrößern ist.

4. Fehlerquellen durch Reflexion an den Diaphragmen sind ausgeschlossen, wie die exakte Gültigkeit des Entfernungsgesetzes und die Konstanz der Ausschläge bei Einschaltung einer weiteren engen Blende in den Strahlengang bewies.

5. Die Fehler durch die Einzelmessungen betragen im Maximum: Entfernung (quadratisch!) $\pm$ 0,1 Proz., Diaphragma 0,0 Proz., bestrahlte Fläche $\pm$ 0,4 bis $\pm$ 0,6 Proz., Strom (quadratisch) $\pm$ 0,1 Proz., Widerstand $\pm$ 0,1 Proz. Die Genauigkeit der galvanometrischen Ausschläge ist bei jeder Messung in Tab. VIII, Reihe 13, angegeben. Alles addiert gibt als größtmöglichen Fehler einer Messung 1,6 Proz.

§ 6. Ergebnis.

Aus meinen Messungen folgt für σ der Wert:

$$\sigma = (5{,}803 \pm 0{,}057) \times 10^{-12} \text{ watt cm}^{-2}\text{ grad}^{-4}$$

$$= 1{,}386 \text{ g cal. cm}^{-2}\text{ grad}^{-4}$$

und

$$S_{100} - S_0 = 0{,}08015 \text{ watt cm}^{-2}\text{ grad}^{-4}$$

$$= 0{,}01914 \text{ g cal. cm}^{-2}\text{ grad}^{-4}.$$

Diese Zahlen sind direkt mit denen Kurlbaums vergleichbar. Sie sind — die vorliegenden Messungen über Reflexion an schwarzen Flächen als richtig angenommen — nach § 5 um etwa 2 Proz. zu vergrößern. Vergleichbar mit Férys Wert wäre $\sigma = 5{,}9 \times 10^{-12}$ watt cm^{-2} grad^{-4}. Das zur Umrechnung der Watt in Grammkalorien erforderliche elektrothermische Äquivalent ist gleich

$$0{,}2388$$

gesetzt.

Für σ stehen sich nun drei Werte gegenüber, $\sigma \times 10^{12}$ watt cm^{-2} grad^{-4} nach:

---

1) Vgl. Anm. 7, p. 26.

Kurlbaum[1]) . . 5,32	Gerlach . . 5,803	Féry[4]) 6,30
Valentiner[2]) . . 5,36		Féry u. Drecq[5]) . 6,51
Bauer u. Moulin[3]) 5,30		

Die Übereinstimmung der Kurlbaumschen und Valentinerschen Messungen kann nicht wundernehmen, beide Werte sind nach gleichen Methoden gefunden und die Valentinerschen Bolometer aus gleichem 1 μ-Blech hergestellt wie die Kurlbaumschen. Für die Messung von S. Valentiner gilt also ebenfalls die Paschensche Erörterung. In der Arbeit von Bauer und Moulin ist nicht bewiesen, daß ein Platinstreif zur gleichen Widerstandsänderung geheizt im Vakuum die gleiche Temperaturverteilung besitzt wie in Luft.[6]) Ihre Platinfolien sind nicht gleichmäßig erhitzt, wie aus ihren Angaben und Abbildungen folgt, eine Ungleichheit, die noch durch die angelöteten Potentialdrähte erhöht wird. Ferner geben Bauer und Moulin (p. 18 des Separatabdruckes) die gemessenen Eichkurven für die Platinfolien im Vakuum und in Luft. Mir scheint die von ihnen für die Strahlungsmessungen angenommene Eichkurve nach ihren im Text gemachten Angaben anders laufen zu müssen, als von ihnen gezeichnet.[7]) Ich berechne nach ihren Angaben statt der von ihnen extrapolierten Zahl 16,9 watt cm^{-2} 19,0 watt cm^{-2}, und demgemäß für $\sigma = 6{,}0 \times 10^{-12}$ watt cm^{-2} grad^{-4}. Férys erste Methode lieferte Werte von 6,04—6,66, als Mittel 6,30, während die neue Modifikation von Féry und Drecq 6,51 ergibt. Doch hat die erste Methode wohl den Vorteil vor der zweiten, einen Gleichgewichtszustand zu beobachten.

Nach meinen Messungen glaube ich schließen zu dürfen, daß nicht in einem hohen Reflexionsvermögen schwarzer Flächen,

1) F. Kurlbaum, Wied. Ann. **65**. p. 746. 1898.

2) S. Valentiner, Ann. d. Phys. **31**. p. 175. 1910.

3) E. Bauer u. M. Moulin, Journ. d. Phys. 3. Dez. 1909.

4) Ch. Fery, Bull. Soc. Franc. Phys. (2) **4**. 1909.

5) Ch. Féry u. M. Drecq, Journ. d. Phys. (V) **1**. p. 551. 1911; Compt. Rend. **152**. p. 590. 1911.

6) Vgl. F. Paschen, Ann. d. Phys. **38**. p. 30. 1912.

7) „La droite $O\,E$ parallèle à la droite V et qui passe par l'origine." Die Gerade parallel der Geraden V führt nicht auf 16,9 watt cm^{-2} für 36,5 Mikrovolt, sondern auf 19,0 watt cm^{-2}.

wie Féry meint, sondern in dem von Prof. Paschen erörterten prinzipiell bedenklichen Punkt des Kurlbaumschen Meßverfahrens sein kleiner Wert begründet ist (wenn auch ein höheres Reflexionsvermögen, als bisher angenommen wird, möglich ist). Denn ich erhalte nach einem Verfahren, das in allem Wesentlichen (schwarze Fläche als Empfänger, Strahlung von 0^0 zu 100^0) dem Kurlbaumschen analog ist, aber den bedenklichen Punkt vermeidet, einen um 9 Proz. höheren Wert für die Strahlungskonstante.

Diese Arbeit ist auf Veranlassung und unter Leitung von Hrn. Prof. Paschen im physikalischen Institut der Universität Tübingen ausgeführt.

Tübingen, den 14. Februar 1912.

(Eingegangen 15. Februar 1912.)